

Kerentanan Air Tanah Di Kawasan Karst Terhadap Kontaminan

Susceptibility of Groundwater in Karst Regions to Contaminants

Ilham Rizki Maulana¹

¹Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Pelita Bangsa

¹ilhamirm@gmail.com

Abstract

Vulnerabilities in groundwater systems in karst areas greatly affect the quality of groundwater. Vulnerabilities are influenced by the identification of infiltration that spreads and concentrates from the karst surface. Decline in the quality of groundwater in the karst area will be a threat to the springs in the karst area to the downstream and surrounding areas that depend on it. This paper provides a compilation of various literature on studies on karst aquifers to understand the karst system against infiltration. Compared to other rock types, karst aquifers are highly vulnerable to contamination due to direct infiltration through streams, shafts and caves. Literature search was carried out using Google scholar, ScienceDirect, and Academia. The literature used in this paper relates to Hydrology, Groundwater, and Karst. Which includes various ways of research and cases in the field. Most of the drugs and pesticides were among the compounds detected in the studies reviewed in karst groundwater. These studies can enhance understanding of vulnerabilities, storage, and in some cases have been used to assist in the delineation of karst areas.

Keywords: Hydrology, Groundwater, Karst

Abstrak

Kerentanan dalam sistem air tanah di Kawasan karst sangat mempengaruhi kualitas air tanah, Kerentanan dipengaruhi oleh identifikasi infiltrasi yang menyebar dan terkonsentrasi dari permukaan karst. Penurunan kualitas air tanah di kawasan karst akan jadi ancaman di sumber mata air Kawasan karst hingga ke hilir dan sekitarnya yang bergantung. Artikel ini memberikan kompilasi berbagai literatur tentang studi di akuifer karst untuk memahami sistem karst terhadap infiltrasi. Dibandingkan dengan jenis batuan lainnya, akuifer karst sangat rentan terhadap pencemaran karena infiltrasi langsung melalui aliran sungai, poros, dan gua. Pencarian literatur dilakukan menggunakan Google scholar, ScienceDirect, dan Academia. Literatur yang digunakan dalam makalah ini berkaitan dengan Hidrologi, Air Tanah, dan Karst. Yang mencakup berbagai cara penelitian dan kasus di lapangan. Sebagian besar obat-obatan dan pestisida adalah diantara beberapa senyawa yang terdeteksi dalam studi yang ditinjau di air tanah karst. Studi ini dapat meningkatkan pemahaman tentang kerentanan, penyimpanan, dan dalam beberapa kasus yang telah digunakan untuk membantu penggambaran daerah Kawasan karst.

Kata kunci: Hidrologi, Air Tanah, Karst

Pendahuluan

Akuifer karst merupakan sumber air tanah yang sangat penting, dengan sekitar 12 % dari permukaan tanah bumi ditutupi oleh karst dan 25% dari populasi global sepenuhnya atau sebagian bergantung pada air minum dari akuifer karst [1], [2]. Air hujan yang jatuh di daerah karst sebagian besar akan mengalami perkolasi ke dalam tanah melalui rongga-rongga atau diaklas yang banyak terdapat di daerah karst, sehingga sistem sungai yang berkembang adalah sistem sungai bawah tanah. Air permukaan hanya dijumpai pada telaga (embung) yang ada di daerah karst, yang semula adalah lembah dolina yang bagian dasarnya tertutup oleh lapisan tanah terrarosa yang kedap air sehingga mampu menampung air hujan dalam jumlah tertentu[3]. [4] melaporkan dari hasil studi untuk sistem karst di Swiss bahwa epikarst yang terhubung ke saluran bertindak sebagai elemen

penyimpanan dalam sistem karst dan mendistribusikan air baik sebagai komponen aliran dasar atau aliran cepat komponen. Sebaliknya, transportasi air dan kontaminan dalam sistem retak dapat dipengaruhi oleh proses difusi antara air rekahan bergerak dan yang lebih tidak bergerak air matriks batuan. Mekanisme intensitas cahaya secara tidak menentu pada akuifer karst, Dalam akuifer berbagai proses seperti pengenceran, dispersi, penyebaran, dan penyerapan penting dalam mengendalikan pelemahan secara alami. Karst banyak akan saluran umumnya dianggap memiliki kemampuan redaman yang buruk karena input air tanah yang cepat dan terfokus melalui aliran sungai. dan aliran air tanah yang cepat yang dapat melebihi kecepatan 30 km/d dan karena Kawasan karst mengandung unsur hara yang rendah [5]

Daerah karst dicirikan oleh batuan dasar yang relatif mudah larut yang membentuk retakan, saluran, gua, lubang pembuangan, dan aliran yang tenggelam [6]. Hasil studi [7], [8] Didalam bukunya, dibandingkan dengan jenis batuan lainnya, akuifer karst sangat rentan terhadap pencemaran karena masuknya air ke dalam tanah langsung melalui aliran sungai, poros, dan gua. Untuk menilai kerentanan akuifer karst, penting untuk memahami karakteristiknya dari respon mata air, terutama mata air karst yang menonjol variasi debit dan kualitas setelah peristiwa turunya air hujan [9]. Air tanah umumnya kurang rentan terhadap kontaminasi oleh EOC dibandingkan air permukaan [10], tetapi jejak konsentrasi banyak polutan, termasuk EOC, masih sering terdeteksi di air tanah [11], [12] Apalagi beberapa zat yang ada di air tanah adalah menetap dan sulit diobati. Kasus pencemaran air tanah oleh tembusnya air limbah, air tercemar yang masuk kedalam tanah dapat diangkut melalui jalur aliran cepat dan memiliki efek jangka pendek pada kualitas air tanah atau menyusup ke rekahan dan matriks, oleh karena itu memiliki efek jangka panjang pada akuifer [13]. Tujuan artikel ini untuk menyediakan kompilasi berbagai ulasan penelitian tentang akuifer karst, mengidentifikasi sumber pencemar, dan penggambaran daerah tangkapan,

Metode Penelitian

Pencarian literatur dilakukan menggunakan Google scholar, ScienceDirect, dan Academia. Literatur yang digunakan dalam artikel ini Nasional dan Internasional yang berkaitan dengan Hidrologi, Air Tanah, dan Karst. Artikel ini mempelajari sistem karst terhadap infiltrasi dan kasus di lapangan tentang Kerentanan kualitas air tanah di Kawasan karst. Beberapa tinjauan artikel dievaluasi berdasarkan judul, kata kunci dan abstrak yang terkait dengan akuifer karst. Teknik analisis data yang digunakan meliputi: pengumpulan data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan, sehingga menambah wawasan tentang sistem akuifer karst dari beberapa negara. Artikel ini mencakup berbagai cara penelitian dan kasus di lapangan. Sebagian besar obat-obatan dan pestisida adalah diantara beberapa senyawa yang terdeteksi dalam studi yang ditinjau di air tanah karst. Studi ini dapat meningkatkan pemahaman tentang kerentanan, penyimpanan, dan dalam beberapa kasus yang telah digunakan untuk membantu penggambaran daerah Kawasan karst yang dibandingkan dari wilayah karst berada.

Hasil dan Pembahasan

Sebagian besar literatur yang didapat dari penelitian di Eropa, Amerika Serikat, dan Indonesia, meskipun jumlah studi dalam artikel ini sedikit, tetapi mampu menambah wawasan tentang sistem hidrologi di Kawasan akuifer karst. Menurut [14] Sistem air tanah karst sangat rentan terhadap kontaminasi. Kerentanan sistem karst sulit untuk dinilai karena dua litasnya masuknya air ke dalam tanah dan aliran, pengisian ulang melalui penyaringan terkonsentrasi di lubang ambles atau lembah kering. Didalam akuifer karst biasanya senyawa ditemukan dalam konsentrasi yang dianggap terlalu rendah, atau dengan beberapa kali lipat, menyebabkan efek

toksitas akut [15],[16] menemukan dalam penelitiannya bahwa air tanah di dalam akuifer karst lebih rentan dari yang diperkirakan sebelumnya. Lapisan luar yang kaya akan tanah liat dianggap memberikan pengaruh yang signifikan perlindungan air tanah ke akuifer karst, tetapi konsentrasinya tinggi DEET, dengan peningkatan lebih dari lima kali lipat setelah musim hujan, terlihat bahwa kontaminan dapat berpindah dengan cepat dari permukaan ke batuan dasar akuifer. Didukung juga penelitian yang dilakukan [3] di daerah Bukit Jimbaran, Kuta Selatan, Badung, Bali, Indonesia, pada tabel 1, 2, dan 3.

Tabel 1. Pengujian Tanpa Perlakuan [3]

No	Debit Air	Perlakuan	Laju penyusutan	Keterangan
1	0,5 l	tanpa	0,5 l/menit	-
2	0,5 l	tanpa	0,5 l/menit	-
3	0,5 l	tanpa	0,5 l/menit	-
4	0,5 l	tanpa	0,5 l/menit	-

Tabel 2. Pengujian Arang Sekam [3]

No	Debit Air	Perlakuan	Laju penyusutan	Keterangan
1	0,5 l	Arang sekam	0,5 l/menit	-
2	0,5 l	Arang sekam	0,1 l/menit	-
3	0,5 l	Arang sekam	0,1 l/menit	-
4	0,5 l	Arang sekam	0,1 l/menit	-

Tabel 3. Pengujian tanah liat [3]

No	Debit Air	Perlakuan	Laju penyusutan	Keterangan
1	0,5 l	Tanah liat	0,05/menit	-
2	0,5 l	Tanah liat	0,05 l/menit	-
3	0,5 l	Tanah liat	0,05 l/menit	-
4	0,5 l	Tanah liat	0,05 l/menit	-

Menurut [3] Hasil penelitian yang dijabarkan pada table 1, 2, dan 3, hasil uji maka menggunakan suspensi tanah liat paling tahan untuk menahan air, Tanah liat mampu menghambat laju resapan air pada batu kapur. penyebaran kontaminan juga terjadi melalui tanah dan epikarst yang membentuk zona tidak jenuh yang relatif tebal terdiri dari tanah, epikarst dan matriks batuan tak jenuh, terbentuknya zona jenuh dari sistem saluran yang sangat berpori mampu menguras penyimpanan kerekahan rendah [17]. Didukung juga penelitian yang dilakukan [11], [18].

Tabel 4. Ringkasan hasil analisis polutan kutub di Sungai UE [18]

Chemical	CAS No.	RL [ng/L]	Freq [%]	Max [ng/L]	Average [ng/L]	Med [ng/L]	Per90 [ng/L]	Limit [ng/L]
Negative mode (method 1)								
4-Nitrophenol	100-02-7	1	97	3471	99	16	95	100
2,4-Dinitrophenol	51-28-5	1	86	174	18	10	40	100
Bentazone	25057-89-0	1	69	250	14	4	31	100
2,4-D (Dichlorophenoxyacetic acid)	94-75-7	1	52	1221	22	3	35	100
Ketoprofen	22071-15-4	3	14	239	10	0	17	100
Naproxen	22204-53-1	1	69	2027	38	4	47	100
Bezafibrate	41859-67-0	1	55	1235	32	4	56	100
Mecoprop	7085-19-0	1	43	194	15	0	54	100
Ibuprofen	15687-27-1	1	62	31,323	395	6	220	200
Diclofenac	15307-86-5	1	83	247	17	5	43	100

Gemfibrozil	25812-30-0	1	35	970	29	0	17	100
Perfluorinated acids								
PFHxA; perfluorohexanoate	68259-11-0	1	39	109	4	0	12	30
PFHpA; perfluoroheptanoate	375-85-9	1	64	27	1	1	3	30
PFOA; perfluorooctanoate	335-67-1	1	97	174	12	3	26	30
PFNA; perfluorononanoate	375-95-1	1	70	57	2	1	3	30
PFOS; perfluorooctansulfonate	EDF-508	1	94	1371	39	6	73	30
PFDA; perfluorodecanoate	335-76-2	1	40	7	1	0	1	30
PFUnA; perfluoroundecanoate	2058-94-8	1	26	3	0	0	1	30
Positivemode (method 2)								
Caffeine	58-08-2	1	95	39,813	963	72	542	1000
1H-Benzotriazole	95-14-7	1	94	7997	493	226	1225	1000
1-Methyl-1H-benzotriazole (tolyltr.)	13351-73-0	1	81	19,396	617	140	1209	1000
Atrazine-desethyl	6190-65-4	1	48	80	7	0	21	100
Sulfamethoxazole	723-46-6	1	75	4072	76	15	104	100
Terbutylazine-desethyl	30125-63-4	1	69	76	10	4	24	100
Simazine	122-34-9	1	26	169	10	0	34	1000
Carbamazepine	298-46-4	1	95	11,561	248	75	308	100
Atrazine	1912-24-9	1	68	46	3	1	6	600
Isoproturon	34123-59-6	1	70	1959	52	4	86	300
Diuron	330-54-1	1	70	864	41	10	115	200
Terbutylazine	5915-41-3	1	65	124	9	2	29	100
Phenoliccompounds(method3)								
BisphenolA	80-05-7	5	34	323	25	0	64	100
NonylphenoxyaceticacidNPE_{1}C	3115-49-9	2	97	7491	553	233	987	1000
Nonylphenol	84852-15-3	50	29	4489	134	0	268	300
tert-Octylphenol	140-66-9	10	9	557	13	0	0	100
Steroid estrogens								
Estrone	53-16-7	2	16	81	4	0	10	10
17b-Estradiol	50-28-2	5	0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
17a-Ethinylestradiol	57-63-6	5	0	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Pada Tabel 4 dan 5 konsentrasi maksimum EOC di akuifer karst yang dibandingkan dengan nilai yang ditemukan di berbagai akuifer secara global [11] dan perairan permukaan di Eropa [18]. Maksimum konsentrasi tergantung pada keberadaan dan sifat sumber kontaminan dalam tangkapan. Namun, konsentrasi maksimum tampak lebih rendah di karst air tanah dibandingkan dengan jenis akuifer lain untuk karbamazepin, kafein, ibuprofen, nonilfenol, hormon; tetapi lebih tinggi untuk sukralosa, metoprolol, tetrasiklin; dan sebanding dengan parasetamol, oxazepam, dan 1H-benzotriazole. Sedangkan secara keseluruhan maksimal tampak konsentrasi lebih rendah di air tanah karst, hampir 25% dari senyawa memiliki konsentrasi maksimum yang sebanding atau lebih besar di karst dibandingkan dengan akuifer lainnya. Konsentrasi maksimum yang dilaporkan [11] sering berasal dari tanah endapan dangkal akuifer, dan dengan demikian mewakili sistem air tanah yang sangat rentan, yang sering secara berkala dalam kontinuitas hidrolis dengan permukaan perairan, dan karenanya ada kemungkinan memiliki konsentrasi mikroorganisme yang kontaminasi tinggi, seperti sistem karst.

Tabel 5. Ringkasan statistik untuk konsentrasi maksimum (ng/L) yang ditemukan di air tanah untuk EOC dan degradasi yang terdeteksi [11]

	n	Lowest	Average	Highest	Use	log Kow
Pharmaceuticals						
Carbamazepine	23	1,64	5312	99,194	Antiepileptic	1,51
Sulfamethoxazole	15	5,7	252	1110	Antibiotic	0,9
Ibuprofen	14	0,6	1491	12,000	Anti-inflammatory	2,48
Diclofenac	11	2,5	121	590	Anti-inflammatory	1,9
Clofibric acid	8	4	1113	7300	Lipid regulator	2,88
Paracetamol	8	15	15,142	120,000	Analgesic	0,46

Ketoprofen	6	3	611	2886	Anti-inflammatory	3,12
Triclosan	6	7	509	2110	Antibiotic	4,76
Iopamidol	5	130	760	2400	X-ray contrast media	-242
Lincomycin	5	100	188	320	Antibiotic	0,56
Propyphenazone	5	15	553	1250	Analgesic	2,02
Sulfamethazine	5	120	298	616	Veterinary medicine	0,28
DEET	4	454	2251	6500	Insect repellent	2
Phenazone	4	25	1503	3950	Analgesic	2,32
Primidone	4	110	3380	12,000	Barbiturate	0,91
Salicylic acid	4	43	418	1225	Analgesic	2,26
Life-style compounds						
Caffeine	14	13	9774	110,000	Diuretic	-0,07
Cotinine	4	60	173	400	Stimulant	0,07
Industrials						
Bisphenol A	9	470	2527	9300	Plasticiser	3,18
Nonylphenol	6	1500	23088	84,000	Detergent	4,4
Galoxalide	5	6	4984	23,000	Fragrance	5,9
TCEP	4	495	656	740	Fire retardant	1,78
Hormones						
Estrone	6	0,1	9	45	Estrogenic hormone	2,95
17b-Estradiol	4	0,79	31	120	Estrogenic hormone	3,86

Didukung juga penelitian yang dilakukan [13], [19]. Menemukan beberapa lokasi, zat terlarang (seperti atrazin) dapat ditemukan bukti bahwa akuifer karst dapat menyimpan kontaminan yang signifikan dan atau jalur waktu tinggal yang lebih lama. Didukung juga penelitian yang dilakukan [20] menemukan perbedaan yang signifikan dan lebih rendah frekuensi yang terdeteksi pada rekahan/batu gamping yang terlarut dibandingkan dengan atasnya akuifer, keretakan dangkal yang menyebar tetapi menunjukkan bahwa banyak dari zat mencapai akuifer karst yang lebih dalam (misalnya pestisida dan metabolitnya). [21] menemukan senyawa yang paling sering terdeteksi pada sampel air tanah karst terdapat dua zat standar yang digunakan dalam diagnosa Xray, diatrizoic acid (DA), yang penggunaannya telah banyak berkurang sejak 2008, dan iopamidol (IP), yang merupakan pengganti untuk DA.

Hasil penelitian di akuifer Kapur di bawah bahan kimia tanaman di Inggris [22] Bisfenol A (BPA), parasetamol, dan 2,6-dichlorobenzamide (BAM) termasuk di antara 20 senyawa teratas di konsentrasi dan frekuensi terdeteksi, dan karenanya menunjukkan risiko terbesar bagi ekosistem perairan karst. [23] menunjukkan bahwa setidaknya satu senyawa terdeteksi pada tingkat yang lebih besar sampel dari batuan karbonat (26%) dibandingkan dengan batuan non-karbonat batuan (19%), tetapi berbeda pada konsentrasi dan frekuensi terdeteksi paling banyak sebaliknya, senyawa lebih tinggi pada batuan non-karbonat. Hasil dari studi nasional di Inggris dan Wales. [24] dalam bukunya memberikan hasil studi di Edwards Aquifer di Texas yang berguna untuk berbagai jenis kontaminan yang muncul (Farmasi, produk perawatan pribadi dan hormon; penghambat api; Senyawa Alkil Perfluorinasi dan Polifluorinasi; partikel nano; dan Mikroplastik), dengan studi yang telah dilakukan mendeteksi berbagai jenis kontaminan yang muncul di karst air tanah. Mereka menyoroti kerentanan terhadap polusi dari Emerging Contaminants dan merekomendasikan masa depan untuk menyelidiki ini.[13], menggunakan dua obat, diklofenak dan ibuprofen, dari limbah air di mata air, untuk pemodelan dan studi pengujian pelacak atenuasi. Mereka menyimpulkan bahwa Bergeraknya kontaminan secara signifikan dipengaruhi oleh difusi antara komponen aliran rekahan bergerak dari akuifer dan air tanah di matriks. Di akuifer yang sangat terkarstifikasi kontaminan dapat dilemahkan. Studi EOC telah berkontribusi untuk memahami mekanisme pelemahan [13]. Secara khusus, penelitian telah mempertimbangkan pelemahan

melalui difusi antara berbagai jenis rongga (misalnya saluran, celah, dan rekahan)[13]. Studi lain secara tidak langsung telah memberikan informasi tentang proses pelemahan [25], [26]. Keberadaan EOC dapat mengindikasikan aliran air tanah yang deras dan kerentanan yang tinggi, tidak berarti tidak adanya EOC kerentanan rendah jika ada sumber kontaminan EOC yang terbatas di daerah tangkapan air. Menurut [27] EOC dapat membantu mengidentifikasi asal polusi di air tanah. [25] berpendapat EOC dapat digunakan sebagai bukti cepatnya aliran air tanah dan kerentanan yang tinggi, Karst tes pelacak air tanah telah dilakukan menggunakan kafein dan hasilnya diperoleh. Dalam beberapa kasus, EOC telah digunakan bersamaan dengan parameter lain untuk penilaian kerentanan [26].

Menurut [28] penambangan batu gamping di Kawasan karst Gunung Sewu Indonesia, akan terjadi degradasi jumlah air yang tersimpan sebagai komponen sungai Bribin karena hilangnya bukit karst. Sebagai suatu akuifer yang sangat berpotensi, bukit-bukit karst (*conical hills*) dengan porositas sekundernya yang mencapai lebih dari 30%. Akan terjadinya perubahan komposisi aliran dasar (diffuse flow) dibanding aliran total. Jika permukaan bukit karst ditambang, maka proporsi aliran dasar terhadap aliran total sungai Bribin otomatis akan berkurang. Hal ini akan meningkatkan agresivitas airtanah terutama pada saat musim hujan, sehingga proses pelarutan akan menjadi semakin cepat, perkembangan lorong-lorong pada akuifer karst akan semakin cepat, dan pelebaran lorong SBT akan semakin cepat. (Adji, n.d) .) Adanya degradasi atau kemungkinan pencemaran kualitas air. Salah satu hal yang paling dikhawatirkan adalah karena posisi penambangan adalah tepat diatas S. Bribin. hal ini akan memicu pencemaran jika penambangan bukit karst memotong vertical cavities atau lorong vertikal sebagai penghubung zona permukaan dan sungai bawah tanah. di Desa Kajengan Kecamatan Todanan Kabupaten Blora, akibat adanya aktivitas penambangan di Kawasan karst Berkurangnya debit air, sehingga pasokan air untuk disalurkan ke desa-desa diluar Desa Kajengan berkurang, sehingga suhu di daerah tersebut semakin panas [29].

Kesimpulan

Sifat dan nasib selanjutnya yang berbeda di karst. Kehadiran dengan cepat EOC yang menurun (misalnya kafein) dapat menjadi indikator air tanah yang cepat aliran dan kerentanan; dan kerentanan akuifer juga ditunjukkan oleh konsentrasi tinggi EOC atau berbagai EOC yang berbeda di suatu lokasi. Namun, studi sampling sistematis diperlukan untuk memastikan secara lebih pasti bagaimana terjadinya EOC di air tanah karst dibandingkan dengan air permukaan dan akuifer lainnya. Jelas bahwa karst sangat rentan terhadap kontaminasi berpotensi menimbulkan dampak serius baik pada pasokan air minum maupun karst ekosistem yang bergantung. EOC jelas merupakan ancaman penting bagi kualitas air tanah karst yang dapat berdampak pada sumber air minum, sungai, dan ekosistem lain yang bergantung.

Daftar Rujukan

- [1] Z. Chen *et al.*, 'Le programme de la Carte Mondiale des Aquifères Karstiques: concept, procédure de cartographie et carte de l'Europe', *Hydrogeol. J.*, vol. 25, no. 3, pp. 771–785, May 2017, doi: 10.1007/s10040-016-1519-3.
- [2] A. Hartmann, N. Goldscheider, T. Wagener, J. Lange, and M. Weiler, 'Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches', *Reviews of Geophysics*, vol. 52, no. 3, pp. 218–242, Sep. 01, 2014. doi: 10.1002/2013RG000443.
- [3] I. G. P. E. Suryana and N. W. E. Wijayanti, 'Potensi Batu Kapur Bukit Pecatu Sebagai Instrumen Pemanen Dan Penampung Air Hujan', *Media Komunikasi Geografi*, vol. 21, no. 1, p. 74, Jun. 2020, doi: 10.23887/mkg.v21i1.23089.
- [4] B. Jérôme Perrin, F. Zwahlen, J. K. member Föllmi, J. H. member Hötzl, and J. member K-P Seiler GSF, 'A conceptual model of flow and transport in a karst aquifer based on spatial and temporal variations of natural tracers', Mar. 2003.
- [5] M. Petrič, N. Ravbar, P. Gostinčar, P. Krsnik, and M. Gacin, 'GIS database of groundwater flow characteristics in carbonate aquifers: Tracer test inventory from Slovenian karst', *Applied Geography*, vol. 118, May 2020, doi:

- 10.1016/j.apgeog.2020.102191.
- [6] D. Weary, D. J. Doctor David Weary Daniel H Doctor, and D. Doctor, 'Karst in the United States: A digital map compilation and Karst in the United States: A digital map compilation and database database Recommended Citation Recommended Citation', 2014, doi: 10.3133/ofr20141156.
- [7] D. (Derek C.) Ford and P. W. (Paul W. Williams, *Karst hydrogeology and geomorphology*. John Wiley & Sons, 2007.
- [8] N. Goldscheider and D. Drew, *Methods in Karst Hydrogeology*, Leiden. 2007. Accessed: Jan. 06, 2023. [Online]. Available:
<https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=nUJZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&ots=M8VniIkpwz&sig=cnrH0cRerv62vwMPVLlxXiU4Tlg>
- [9] M. Pronk, N. Goldscheider, and J. Zopfi, 'Particle-size distribution as indicator for fecal bacteria contamination of drinking water from karst springs', *Environ Sci Technol*, vol. 41, no. 24, pp. 8400–8405, Dec. 2007, doi: 10.1021/es071976f.
- [10] D. White, D. J. Lapworth, W. Civil, and P. Williams, 'Tracking changes in the occurrence and source of pharmaceuticals within the River Thames, UK; from source to sea', *Environmental Pollution*, vol. 249, pp. 257–266, Jun. 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.015.
- [11] D. J. Lapworth, N. Baran, M. E. Stuart, and R. S. Ward, 'Emerging organic contaminants in groundwater: A review of sources, fate and occurrence', *Environmental Pollution*, vol. 163, pp. 287–303, Apr. 2012. doi: 10.1016/j.envpol.2011.12.034.
- [12] D. J. Lapworth *et al.*, 'Developing a groundwater watch list for substances of emerging concern: A European perspective', *Environmental Research Letters*, vol. 14, no. 3, Mar. 2019, doi: 10.1088/1748-9326/aaf4d7.
- [13] F. Einsiedl, M. Radke, and P. Maloszewski, 'Occurrence and transport of pharmaceuticals in a karst groundwater system affected by domestic wastewater treatment plants', *J Contam Hydrol*, vol. 117, no. 1–4, pp. 26–36, Sep. 2010, doi: 10.1016/j.jconhyd.2010.05.008.
- [14] B. Andreo *et al.*, 'Karst groundwater protection: First application of a Pan-European Approach to vulnerability, hazard and risk mapping in the Sierra de Líbar (Southern Spain)', *Science of the Total Environment*, vol. 357, no. 1–3, pp. 54–73, Mar. 2006, doi: 10.1016/j.scitotenv.2005.05.019.
- [15] S. D. Costanzo, A. J. Watkinson, E. J. Murby, D. W. Kolpin, and M. W. Sandstrom, 'Is there a risk associated with the insect repellent DEET (N,N-diethyl-m-toluamide) commonly found in aquatic environments?', *Science of the Total Environment*, vol. 384, no. 1–3, pp. 214–220, Oct. 2007, doi: 10.1016/j.scitotenv.2007.05.036.
- [16] J. P. R. Sorensen *et al.*, 'Emerging contaminants in urban groundwater sources in Africa', *Water Res*, vol. 72, pp. 51–63, Apr. 2015, doi: 10.1016/j.watres.2014.08.002.
- [17] T. Geyer, S. Birk, R. Liedl, and M. Sauter, 'Quantification of temporal distribution of recharge in karst systems from spring hydrographs', *J Hydrol (Amst)*, vol. 348, no. 3–4, pp. 452–463, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.10.015.
- [18] R. Loos, B. M. Gawlik, G. Locoro, E. Rimaviciute, S. Contini, and G. Bidoglio, 'EU-wide survey of polar organic persistent pollutants in European river waters', *Environmental Pollution*, vol. 157, no. 2, pp. 561–568, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.envpol.2008.09.020.
- [19] O. Hillebrand, K. Nödler, T. Geyer, and T. Licha, 'Investigating the dynamics of two herbicides at a karst spring in Germany: Consequences for sustainable raw water management', *Science of the Total Environment*, vol. 482–483, no. 1, pp. 193–200, Jun. 2014, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.117.
- [20] S. L. McManus, C. E. Coxon, P. E. Mellander, M. Danaher, and K. G. Richards, 'Hydrogeological characteristics influencing the occurrence of pesticides and pesticide metabolites in groundwater across the Republic of Ireland', *Science of the Total Environment*, vol. 601–602, pp. 594–602, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.05.082.
- [21] M. Zemann *et al.*, 'Tracking changing X-ray contrast media application to an urban-influenced karst aquifer in the Wadi Shueib, Jordan', *Environmental Pollution*, vol. 198, pp. 133–143, 2015, doi: 10.1016/j.envpol.2014.11.033.
- [22] K. A. Bennett, S. D. Kelly, X. Tang, and B. J. Reid, 'Potential for natural and enhanced attenuation of sulphanilamide in a contaminated chalk aquifer', *J Environ Sci (China)*, vol. 62, pp. 39–48, Dec. 2017, doi:

10.1016/j.jes.2017.08.010.

- [23] L. M. Bexfield, P. L. Toccalino, K. Belitz, W. T. Foreman, and E. T. Furlong, 'Hormones and Pharmaceuticals in Groundwater Used As a Source of Drinking Water Across the United States', *Environ Sci Technol*, vol. 53, no. 6, pp. 2950–2960, Mar. 2019, doi: 10.1021/acs.est.8b05592.
- [24] B. Mahler and M. Musgrove, *Emerging contaminants in groundwater, karst, and the Edwards*. 2019. Accessed: Jan. 06, 2023. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1130/2019.1215\(20\)](https://doi.org/10.1130/2019.1215(20))
- [25] O. Hillebrand, K. Nödler, M. Sauter, and T. Licha, 'Multitracer experiment to evaluate the attenuation of selected organic micropollutants in a karst aquifer', *Science of the Total Environment*, vol. 506–507, pp. 338–343, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.10.102.
- [26] J. Doummar and M. Aoun, 'Assessment of the origin and transport of four selected emerging micropollutants sucralose, Acesulfame-K, gemfibrozil, and iohexol in a karst spring during a multi-event spring response', *J Contam Hydrol*, vol. 215, pp. 11–20, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.jconhyd.2018.06.003.
- [27] K. Kiefer, L. Du, H. Singer, and J. Hollender, 'Identification of LC-HRMS nontarget signals in groundwater after source related prioritization', *Water Res*, vol. 196, May 2021, doi: 10.1016/j.watres.2021.116994.
- [28] T. N. Adji, 'KONDISI DAERAH TANGKAPAN SUNGAI BAWAH TANAH KARST GUNUNGSEWU DAN KEMUNGKINAN DAMPAK LINGKUNGANNYA TERHADAP SUMBERDAYA AIR (HIDROLOGIS) KARENA AKTIVITAS MANUSIA 1'.
- [29] D. N. Agustin, N. T. Brata, and J. S. Antropologi, 'Gibek: Aktivitas Ilegal Pertambangan Batu Kapur dan Dampak Ekologi di Kabupaten Blora Info Artikel', 2019. [Online]. Available: <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/solidarity>